

Řešený příklad - Chráněný nosník se ztrátou stability při ohybu

Posuďte nosník I 300 z oceli S 235 na požární odolnost R 90. Nosič podle obrázku je zatížený osamělými břemeny, stálé zatížení $G_k = 16$ kN, proměnné zatížení $Q_k = 18,2$ kN. Proti požáru je nosník chráněn vermikulitovým nástřikem tloušťky $d_p = 8$ mm s hustotou $\rho_p = 650$ kg/m³, měrným teplem $c_p = 1100$ J kg⁻¹ K⁻¹ a tepelnou vodivostí $\lambda_p = 0,12$ W m⁻¹ K⁻¹. Stabilita tlačené pásnice nosníku je zajištěna v podporách a v místech zatížení. Pro nárůst teploty v požárním úseku použijte parametrickou teplotní křivku se součinitelem $\Gamma = 5,791$, maximální teploty je dosaženo v čase $t_{max} = 21$ minut (požár je řízený ventilací).

Posouzení za pokojové teploty

Charakteristická hodnota zatížení

$$P_k = G_k + Q_k = 16,0 + 18,2 = 34,2 \text{ kN}$$

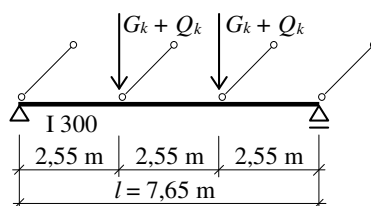
Návrhová hodnota zatížení je

$$P_d = G_k \gamma_G + Q_k \gamma_Q = 16,0 \cdot 1,35 + 18,2 \cdot 1,5 = 48,9 \text{ kN}$$

a působící ohybový moment je

$$M_{sd} = P_d \cdot c = 48,9 \cdot 2,55 = 124,7 \text{ kNm}.$$

Průřez I 300 je 1. třídy.



Obr. 1 Posuzovaný nosník

Pro výpočet součinitele příčné a torzní stability χ_{LT} je rozhodující střední úsek nosníku s délkou 2,55 m. Pro kloubové uložení nosníku na koncích tohoto úseku ($k = 1$) a volnou deplanaci průřezu ($k_w = 1$) se určí kritický moment

$$\begin{aligned} M_{cr} &= c_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k c)^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} \left(\frac{k}{k_w} \right)^2 + \frac{(k c)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} = \\ &= 1,000 \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4510 \cdot 10^3}{(1 \cdot 2550)^2} \sqrt{\frac{91,80 \cdot 10^9}{4510 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{1} \right)^2 + \frac{(1 \cdot 2550)^2 \cdot 81000 \cdot 568,0 \cdot 10^3}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4510 \cdot 10^3}} = \\ &= 328,9 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Poměrná štíhlost při ztrátě stability při ohybu je

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{762 \cdot 10^3 \cdot 235}{328,9 \cdot 10^6}} = 0,738$$

a odpovídající součinitel příčné a torzní stability se pro válcované průřezy určí z křivky b

$$\chi_{LT} = 0,762.$$

Momentová únosnost nosníku je

$$M_{pl,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = 0,762 \frac{762 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,0} = 136,5 \text{ kNm} > 124,7 \text{ kNm} = M_{Sd}$$

Průhyb nosníku uprostřed rozpětí

$$\delta = \frac{23}{648} \frac{P_k l^3}{E I_y} = \frac{23}{648} \frac{34\,200 \cdot 7\,650^3}{210\,000 \cdot 98,00 \cdot 10^6} = 26,4 \text{ mm} < 30,6 \text{ mm} = \frac{l}{250}$$

Nosník za pokojové teploty vyhoví.

Posouzení za požáru

Redukční součinitel zatížení η_{fi} se určí z poměru stálého a proměnného zatížení s kombinačním součinitelem $\psi_{2,1} = 0,3$ pro mimořádnou kombinaci zatížení

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_{2,1} q_k}{g_k \gamma_G + q_k \gamma_Q} = \frac{16,0 + 0,3 \cdot 18,2}{16,0 \cdot 1,35 + 18,2 \cdot 1,5} = 0,439$$

Ohybový moment působící při požární návrhové situaci je

$$M_{fi,Sd} = \eta_{fi} M_{Sd} = 0,439 \cdot 124,7 = 54,7 \text{ kNm}.$$

Teplotu plynů v požárním úseku popisuje parametrická teplotní křivka. Ve fázi rozvoje požáru je popsána vztahem

$$\theta_{g,t} = 20 + 1325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*} \right)$$

kde se čas t v hodinách dosazuje jako náhradní čas t^*

$$t^* = t \Gamma = 5,791 t.$$

Maximální teploty je dosaženo v čase t_{max}

$$t_{max}^* = t_{max} \Gamma = 0,35 \cdot 5,791 = 2,027 \text{ hod}$$

a maximální dosažená teplota plynů v požárním úseku je

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= 20 + 1325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2 \cdot 2,027} - 0,204 e^{-1,7 \cdot 2,027} - 0,472 e^{-19 \cdot 2,027} \right) = \\ &= 1051^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ve fázi chladnutí je průběh teploty popsán vztahem (platí pro $t_{max}^* > 2$)

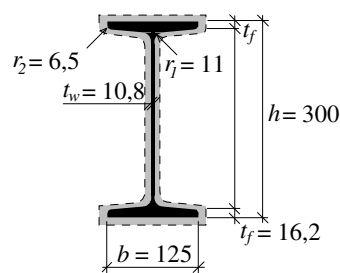
$$\begin{aligned} \theta_{g,t} &= \theta_{max} - 250 (t^* - t_{max}^*)^x = \\ &= 1051 - 250 \cdot (t^* - 2,027 \cdot 1) = \\ &= 1557,8 - 250 \cdot t^* \end{aligned}$$

Pro požár řízený ventilací se použije součinitel $x = 1$.

Součinitel průřezu vystaveného požáru ze čtyř stran

(převzato z tabulek)

$$\frac{A_p}{V} = 149 \text{ m}^{-1}$$



Obr. 2 Průřez chráněný proti požáru nástřikem

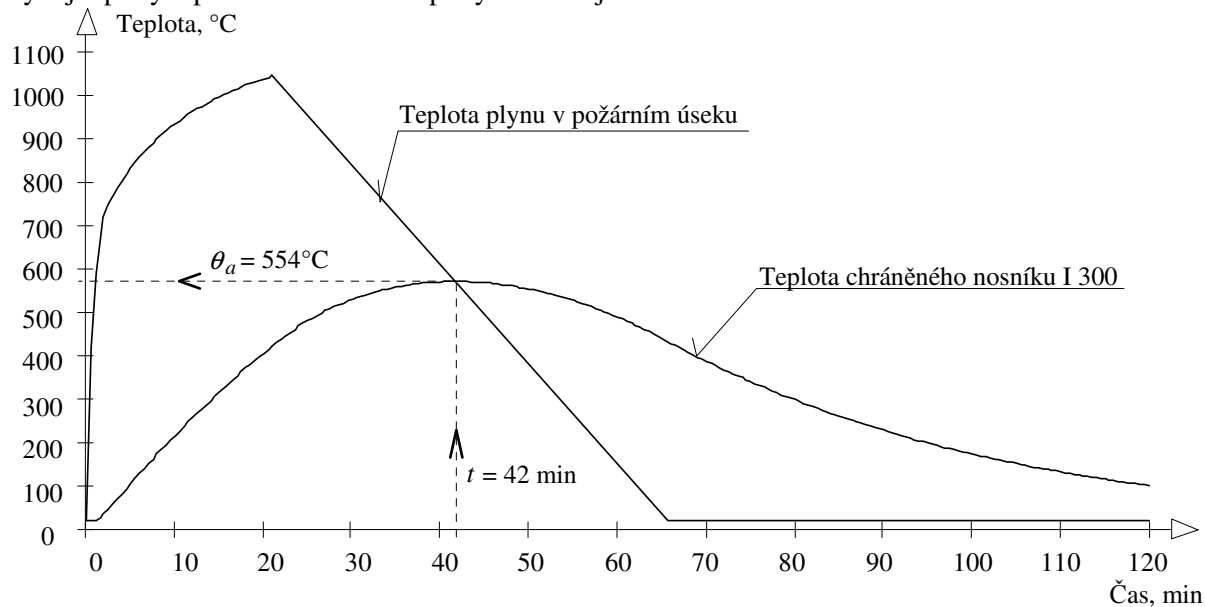
Teplota chráněného ocelového profilu se stanoví přírůstkovou metodou s přírůstkou $\Delta t = 30$ s,

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \Delta t - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad \text{ale musí být} \quad \Delta\theta_{a,t} \geq 0$$

kde tepelná jímavost ochranného materiálu je

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

Vývoj teploty v požárním úseku a teploty nosníku je na obr. 3.



Obr. 3 Vývoj teploty v požárním úseku a chráněném nosníku I 300

Tab. 1 Výpočet teploty konstrukce

Čas min:s	t^* hod	θ_g °C	c_a J kg ⁻¹ °C ⁻¹	ϕ	$\Delta\theta_{a,t}$ °C	$\theta_{a,t}$ °C
0:00	0	20,0	440	0,247	0,0	20,0
0:30	0,048258	420,8	440	0,247	0,0	20,0
1:00	0,096517	594,6	440	0,247	0,0	20,0
1:30	0,144775	676,7	440	0,245	6,0	26,0
2:00	0,193033	721,3	444	0,241	9,5	35,5
2:30	0,241292	750,2	450	0,237	10,9	46,5
3:00	0,289550	772,1	457	0,234	11,5	57,9
3:30	0,337808	790,5	465	0,230	11,7	69,6
4:00	0,386067	807,0	471	0,247	11,7	81,3
40:00	3,860667	591,7	730	0,149	0,5	555,8
40:30	3,908925	579,6	730	0,149	0,4	555,6
41:00	3,957183	567,6	731	0,149	0,3	555,4
41:30	4,005442	555,5	731	0,149	0,1	554,9
42:00	4,053700	543,4	731	0,149	0,0	554,4
42:30	4,101958	531,4	731	0,149	-0,2	573,1
43:00	4,150217	519,3	731	0,149	-0,3	572,8
43:30	4,198475	507,2	731	0,149	-0,4	572,4
44:00	4,246733	495,2	730	0,149	-0,5	571,9
87:00	8,396950	20,0	548	0,198	-3,4	247,4
87:30	8,445208	20,0	546	0,199	-3,3	244,1

88:00	8,493467	20,0	545	0,199	-3,3	240,8
88:30	8,541725	20,0	544	0,200	-3,3	237,6
89:00	8,589983	20,0	543	0,200	-3,2	234,4
89:30	8,638242	20,0	542	0,200	-3,2	231,2
90:00	8,686500	20,0	541	0,201	-3,1	228,1
90:30	8,734758	20,0	540	0,201	-3,1	225,0

Pro klasifikaci průřezu za zvýšené teploty se použije součinitel

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85$$

Zatřídí se stojina

$$\frac{d}{t_w} = \frac{241,6}{10,8} = 22,4 < 72 \varepsilon = 61,2 \quad 1. \text{ třída}$$

a pásnice

$$\frac{c}{t_f} = \frac{46,1}{16,2} = 2,84 < 9 \varepsilon = 7,65 \quad 1. \text{ třída.}$$

Průřez je i při požáru možno zařadit do 1. třídy.

Pro posouzení průřezu je rozhodující nejvyšší teplota dosažená během požadované doby požární odolnosti. Maximální teplota $\theta_a = 554^\circ\text{C}$ byla dosažena v čase $t = 42$ minut. Redukční součinitele meze kluzu a modulu pružnosti pro teplotu jsou:

$$k_{y,\theta} = 0,607$$

$$k_{E,\theta} = 0,438$$

Štíhlost při ztrátě stability v ohybu určená pro tuto teplotu je

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,738 \cdot \sqrt{\frac{0,607}{0,438}} = 0,869$$

Součinitel příčné a torzní stability $\chi_{LT,fi}$ pro parametr

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,65$$

je

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1 + \alpha \lambda_{LT,\theta} + \lambda_{LT,\theta}^2}{2} = \frac{1 + 0,65 \cdot 0,869 + 0,869^2}{2} = 1,160$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} = \frac{1}{1,160 + \sqrt{1,160^2 - 0,869^2}} = 0,519$$

Moment únosnosti nosníku za požáru

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \frac{W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,519 \cdot \frac{762 \cdot 10^3 \cdot 0,607 \cdot 235}{1,0} = 56,4 \text{ kNm} > 54,7 \text{ kNm} = M_{fi,Sd}$$

Nosník vyhovuje, protože moment působící za požáru je menší než únosnost průřezu.

QUALITY RECORD

Název	Chráněný nosník se ztrátou stability při ohybu (řešený příklad)
Popis	Řešený příklad návrhu nosníku nezajištěného proti klopení, který je chráněn proti účinkům požáru vermikulitovým nástřikem a kde je pro rozvoj požáru použita parametrická teplotní křivka.
Kategorie	Ocelové konstrukce
Název souboru	3-4_Příklad_Chraneny_nosnik.pdf
Datum vytvoření	20. 11. 2006
Autor	Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze
Klíčová slova	Nosník; Chráněný průřez; Nechráněný průřez; Klopení; Ohybová únosnost; Součinitel průřezu; Stínění; Redukční součinitel meze kluzu; Redukční součinitel modulu pružnosti; Kritická teplota.
Eurokódy	EN 1991-1-2: Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČSNI, Praha 2004. EN 1993-1-2: Navrhování ocelových konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČSNI, Praha 2006.
Literatura	Wald F. a kol.: Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2005, 336 s., ISBN 80-0103157-8.